



## DYNAMICS OF THE EARTH'S ATMOSPHERE IN THE CONE OF THE MOON'S SHADOW IN DIFFERENT GEOGRAPHICAL LANDSCAPES

**Abstract:** Solar eclipses are only possible during the new moon. If the plane of the lunar orbit coincided with the plane of the ecliptic, there would be a solar eclipse for each new moon. But the plane of the lunar orbit intersects with the plane of the ecliptic at an angle of  $5^{\circ}09'$ . Therefore, the moon usually moves north or south of the ecliptic plane, so no eclipses occur. In order for a solar eclipse to occur, it is necessary that the moon during the new moon be close to the node of its orbit, ie. not far from the ecliptic. The result of these conditions is that there are always 2 solar eclipses (about two knots in the lunar orbit) each year, but there can be 4 or even 5 eclipses. On average at the same place on the earth's surface, total solar eclipses are extremely rare - only once every 200-300 years.

The report presents the results of the processing of temperature and photometric data on atmospheric changes during the reduction of solar radiation caused by the blocking of the Sun's disk by the moon during a total solar eclipse. Data from automatic weather stations and loggers were used, as well as automatic photometers located in the full solar eclipse band. The basic phenomenology of the atmospheric effects of complete eclipses in the absence of solar radiation is described. An attempt has been made to explain the possible errors in the application of statistical analysis of the data from the instruments. The thermal inertia of the earth's atmosphere during the phase evolution of solar eclipse is determined.

The calculations of the thermal response to the atmosphere from the measurements of atmospheric parameters for different solar eclipses observed from different latitudes, altitudes and landscapes are presented. A physical explanation was sought for the time delay (2 to 20 minutes) related to the total eclipse time, the amplitude of the decrease in ambient temperature, the moment of the full phase during the day, the presence of nearby bodies of water such as a lake, sea or ocean, close to forest, mountain range and more.

### Author information:

#### Miroslav Kostov

PhD Student

Space Research and Tehnology Institute –  
Bulgarian academy of Sciences, Sofia

✉ [miroslavkostov@abv.bg](mailto:miroslavkostov@abv.bg)

🌐 Bulgaria

#### Keywords:

solar eclipse, surface atmosphere,  
temperature, solar radiation

### Въведение

Атмосферата на Земята традиционно се използва за пренос на информация от космическите обекти. Качествените показатели на изображенията съществено се ограничават от наличието в атмосферата на турбулентни и конвективни процеси. За изследването им се използват радиофизични, акустични, оптични, радиоакустични и други методи [1]. В настоящата работа за изследване на турбулентните и конвективни процеси в атмосферата се използва класически оптически метод, описан в множество статии [2]. Неговата същност се заключава в следното – с помощта на оптически телескоп се измерва амплитудата на дрожието (специфично трептене) на края на лимба на слънчевия диск по време на частичните фази на пълно слънчево затъмнение. Ефекта на дрожието на лимба се обуславя от атмосферните процеси турбулентност, конвекция и адвекция. Едновременно с оптичните наблюдения се контролира метеобстановката в зоната на затъмнението – облачност, температура на въздуха и скорост на вятъра. За да се разширят възможностите на оптичния метод, и в частност за да се разделят приносите на турбулентните и конвективните процеси

поотделно, измерванията са правени преди настъпването, по време на частичните фази и след края на затъмнението.

Целта на работата е да покаже резултатите от еднотипни оптични наблюдения, анализ и сравнения на параметрите на турбулентните и конвективни процеси съпровождащи две пълни слънчеви затъмнения – 11 август 1999 г. (с. Равнец, България) и 29 март 2006 г. (гр. Манавгат, Турция).

### Пространствено – времеви характеристики на ПСЗ

Пълните слънчеви затъмнения продължават за територии от повърхността на Земята около 3.5 ч, а частичните затъмнения – до около 5.5 ч. За неподвижен наблюдател, средната продължителност на пълната фаза обаче е около 2.5 мин. (в зависимост от мястото на наблюдение), а продължителността на частичното затъмнение – 2.5 ч. Максималната ширина на ивицата на пълното затъмнение не превишава 270 км, а дължината ѝ почти 15 000 км. Лунната сянка се движи по повърхността на Земята от запад на изток със скорост равна на орбиталната скорост на Луната – около 1 000 м/сек. В мястото на наблюдателните площадки по време на двете затъмнения, относителната скорост на движението на лунната сянка бе около 850 м/сек.

Възможна е ситуация, когато тя превишава скоростта на звука в атмосферата, която в зависимост от височината на атмосферния слой се изменя от 300 до 800 м/сек. При това в газа може да се генерира ударна вълна на плътността, която разпространявайки се от източника на излъчване се превръща в акустично – гравитационна вълна [3]. При покриването на слънчевия диск от Луната, повърхността на Земята, ниската атмосфера (до озоносферата включително) и термосферата силно се охлаждат.

### Функция на закриването на Слънцето

За описване на осветеността на Земята, използваме зависимостта

$$E_E(t) = E_E(0) (1 - A'(t)) \cos \chi, \quad (1)$$

където  $E_E(0) = E_E(\chi = 0)$  и  $\chi$  е зенитния ъгъл.

При по-точно описание на израза (1), функцията на покриване  $A'(t)$  трябва да се замени с функцията  $A(t)$ , която отчита разпределението на яркостта по диска на Слънцето. Определянето на това разпределение се прави с помощта на безразмерната функция от вида:

$$i(r) = \mu_0 + (1 - \mu_0)(1 - r^2),$$

където  $r$  е безразмерното разстояние от центъра на диска на Слънцето до произволна точка по диска му,  $\mu_0 = 0.46$  - коефициент. Връзката между  $A(t)$  и

$A'(t)$  е следната:  $A(t) = A'(t) \cdot i(r)$ , където  $0 < r < 1$ .

### Средства и методи за наблюдение

Използван е оптичен метод за наблюдение на джоганието на лимба на незатъмнения слънчев диск във фазовата еволюция на затъмнението. Атмосферните ефекти предизвикани от две пълни слънчеви затъмнения са се наблюдавали в хода на тяхното развитие. Наблюденията са осъществени с 200/2 250 мм рефлектор с фокален редуктор 3x, кръстовиден процеп и микрометрична приставка във фокалната равнина, снабдена с бързодействащ фотографски тракт. Еквивалентното фокусно разстояние на телескопа бе 6 750 мм. Оптическите измервания са се съпровождали с регистрация на температурата на въздуха на всеки 5 секунди. За целта са използвани предварително тарирани електронни термометри, с точност 0.1°C, работещи в автоматичен режим.

Измерването на температурата на въздуха, скоростта на вятъра и наблюдения над състоянието на времето са били изпълнени в деня преди и след затъмнението, както и в деня на

самото затъмнение. Измерванията на амплитудата на джожанието на края на слънчевия диск са били правени няколко часа до настъпването, по време на самото затъмнение и няколко часа след приключването му.

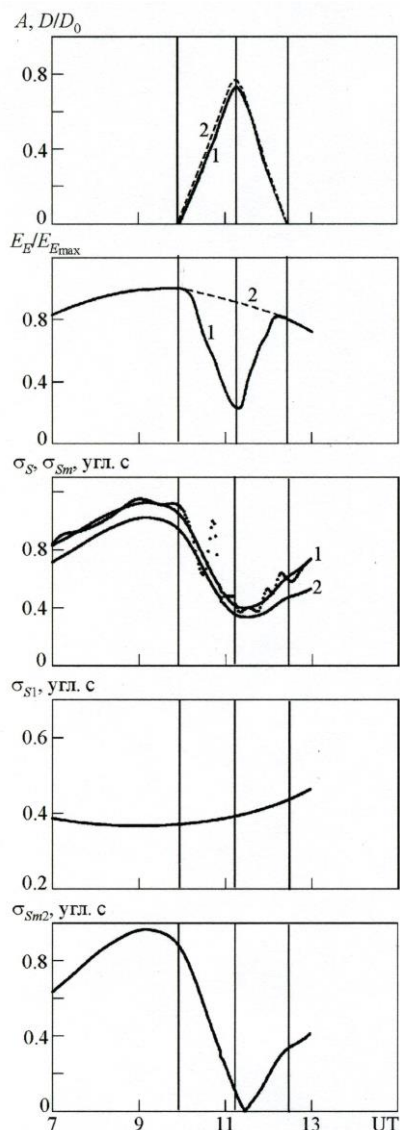
Апертурата на телескопа е била ограничена с диафрагма – 5 см по време на двете описани затъмнения. Във фокуса на телескопа е била монтирана правоъгълна диафрагма с размери 25x45" по посока на лимба на Слънцето и перпендикулярно на него. Слънчевия лимб е излизал на 25" от края на диафрагмата. Направени са измервания на амплитудата на джожание на края на лимба на Слънцето, обусловено от турбулентни и конвективни процеси в приземната атмосфера. Светлината, преминала през диафрагмата и филтъра е била регистрирана от бързодействащо фотографско устройство. Получени са 42 оценки за затъмнението през 1999 г. през 15 мин. и 46 оценки през 12 мин. за затъмнението през 2006 г. След фотометрична обработка на фотографския материал който ми бе предоставен от експедиционния архив на Астрономическа обсерватория, Стара Загора успях да получа преместването на края на Слънцето в диафрагмата, което е пропорционално на оценка на ефекта от джожанието на изображението. Това е така, тъй като промяната на яркостта на фотосферата на ъглово разстояние 20" от края на лимба не превишава 1% на 1". При преместване 5" тази яркост може да се счита за линейна функция. При това преместването 1" води до промяна на нивото на сигнала от фотометрията с 5%.

След фотометричната обработка бе получена амплитудата на сигнала  $s(t)$  в цифров вид, който бе съхранен за по-късна обработка. Получената зависимост  $s(t)$  бе използвана за изчисляването на автокорелационната функция  $K_s$  и енергетичния спектър. Стойността на  $K_s(0)$  е пропорционално на дисперсията на преместването  $\sigma_s^2$  на края на лимба на слънчевия диск, при което  $K_s(0) = 10^{-4}$  съответства на  $\sigma_s = 0.25''$ .

### Наблюдателни резултати

#### 1. Пълно слънчево затъмнение на 11 август 1999 г.

В деня на ПСЗ стойността на  $\sigma_s$  постепенно се увеличаваше от  $0.62'' \pm 0.01''$  (04:18UT) до  $1.15'' \pm 0.04''$  (09:10 UT). Интересно, че в интервала 04.22 – 07.20 UT стойността на  $\sigma_s$  почти не зависеше от зенитния ъгъл на Слънцето  $\chi$ , макар осветеността на повърхността на Земята през това време да нарасна два пъти (вж Фиг. 1). От 07:00 до 09:00 UT големината на  $\sigma_s$  се удвои, а осветеността се увеличи едва 20 %. Започвайки от 09:00, се наблюдаваше отначало бавно (до 10:00), а след това и бързо намаляване на  $\sigma_s$ . В интервала 11:16 – 11:32 UT то достигна минималната стойност от порядъка 0.4". По-нататък от 11:49 до 13:00 започна бавно нарастване на  $\sigma_s$ . Това поведение на стойността на  $\sigma_s$  бе устойчиво за кратки периоди. В 10:45 и 11:07 наблюдаваше нарастване на  $\sigma_s$  до стойности  $0.96'' \pm 0.02''$  и  $0.65'' \pm 0.01''$  съответно. След 11:10 в продължение на 2 ч. се наблюдаваха квазипериодични вариации на  $\sigma_s(t)$ , като големината на квазипериода бе около 20 ÷ 25 мин., а относителната амплитуда на вариациите бе около 6 ÷ 8 %. Такива параметри както е известно са характерни за атмосферните гравитационни вълни и в случая тяхното появяване можем да свържем с фазовата еволюция на пълното слънчево затъмнение [4]. При това, поради еднопозиционния характер на нашите наблюдения ние не можем да различим в тях приноса на вариативните и вълнови процеси в атмосферата.

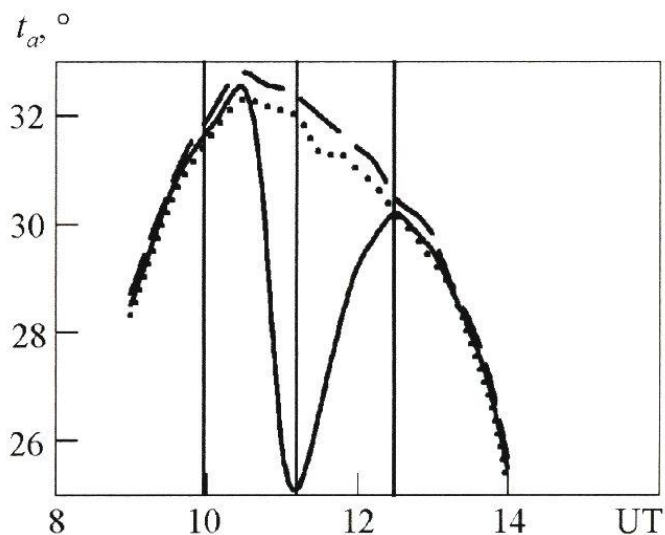


Фиг. 1. Вариации на функцията на покритие на диска на Слънцето (1), отношението на покрития  $D$  спрямо пълния  $D_0$  диаметър на Слънцето (2); относителната осветеност на повърхността на Земята в деня на затъмнението на 11 август 1999 г. (а) и контролния ден (б); средноквадратичното отклонение на преместването на лимба на слънчевия диск  $\sigma_S$  (1), отклонението след изключване влиянието на намаляването на размерите на атмосферния слой (2); промяната на  $\sigma_S$ , свързана с механичната турбулентност ( $\sigma_{S1}$ ) и  $\sigma_S$ , обусловена от конвекцията ( $\sigma_{Sm2}$ ) след изключване влиянието на намаляването на размерите на атмосферния слой. Вертикалните линии отбелязват моментите на начало, максимално покритие и края на пълното слънчево затъмнение.

Пресметнатите стойности на  $Ks(j)$  имаха следното развитие. Сутринта (04:20 – 04:28UT) в условията на слабо изразена конвекция  $Ks(0) \approx 609 \pm 19$  (тука и по-нататък в единици  $10^{-6}$ ), интервала на автокорелация е  $\tau_k \approx 60$  мс (при това на ниво на намаляване на  $Ks(j)$  два пъти). В момента около местното пладне (08:31 – 08:34UT)  $Ks(0) \approx 1790 \pm 100$ , при  $\tau_k \approx 30$  мс. При това в атмосферата се наблюдаваше най-голяма конвекция. Скоро след максималното покриване на диска на Слънцето (20 – 10 сек. до пълната фаза, 11:32 – 11:35UT)  $Ks(0) \approx 259 \pm 6$ ,  $\tau_k \approx 50$  мс. Получените стойности на  $\tau_k$  отразяват скоростта на реакция на атмосферните процеси (при

временен интервал на дискретизация 20 мс). Усилването на конвекцията в средата на деня доведе до увеличаване на  $K_s(0)$  почти 3 пъти. По време на максималната фаза на затъмнението конвекцията в атмосферата почти напълно престана, и  $K_s(0)$  намалѐ почти 2.6 пъти в сравнение със сутрешните стойности и 7 пъти в сравнение със стойностите по пладне.

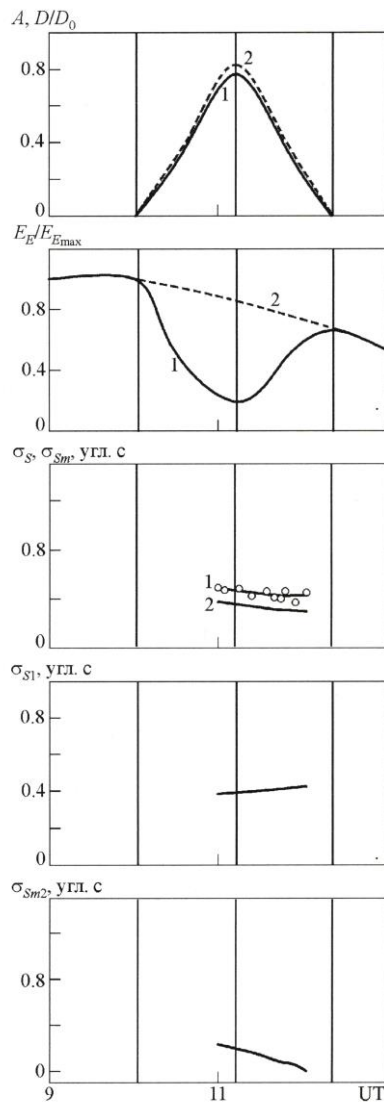
Вариациите на температурата на въздуха  $t_a$  в деня преди затъмнението, по време на ПСЗ и на следващия ден може да се видят на фиг. 2. Слънчевото затъмнение е предизвикало падането на температурата почти  $7.5^\circ\text{C}$ . Скоростта на намаляване на стойността на  $t_a$  в този ден бе много голяма – съответно 11 и  $5^\circ\text{C} / \text{ч}$ . Във фоновите дни тази скорост бе близка до около  $1^\circ\text{C} / \text{ч}$ .



Фиг. 2. Вариации на температурата на въздуха в приземната атмосфера в деня на затъмнението 11 август 1999 г. (непрекъснатата линия), 10 август 1999 г. (шрихованата линия) и 12 август 1999 г. (линията от точки)

#### Пълно слънчево затъмнение на 29 март 2006 г.

В деня на ПСЗ стойността на  $\sigma_s$  постепенно се увеличаваше от  $0.44'' \pm 0.01''$  (04:56UT) до  $1.02'' \pm 0.02''$  (09:15 UT) (вж Фиг. 3). По – нататък обаче поведението на  $\sigma_s(t)$  за това слънчево затъмнение се отличаваше от това, случило се през 1999 г. След настъпването на пълната фаза и след нея, стойностите на  $\sigma_s(t)$  продължиха да намаляват почти до 12:15 UT. Температурата на въздуха основно бе отклик на фазовата еволюция на ПСЗ (вж Фиг. 4). При максималното покриване на слънчевия диск,  $t_a$  намалѐ до  $2.5^\circ\text{C}$ . В края на затъмнението тя се върна към хода си при несмутена приземна атмосфера. Скоростта на намаляване на  $t_a$  при затъмнението бе около  $2^\circ\text{C} / \text{ч}$ ., а в съседните дни тя обикновено не надхвърляше  $1^\circ\text{C} / \text{ч}$ .



Фиг. 3. Вариации на функцията на покритие на диска на Слънцето (1), отношението на покрития  $D$  спрямо пълния  $D_0$  диаметър на Слънцето (2); относителната осветеност на повърхността на Земята в деня на затъмнението 29 март 2006 г. (а) и контролния ден (б); средноквадратичното отклонение на преместването на лимба на слънчевия диск  $\sigma_s$  (1), отклонението след изключване влиянието на намаляването на размерите на атмосферния слой (2); промяната на  $\sigma_s$ , свързана с механичната турбулентност ( $\sigma_{s1}$ ) и  $\sigma_s$ , обусловена от конвекцията ( $\sigma_{sm2}$ ) след изключване влиянието на намаляването на размерите на атмосферния слой.

### Резултати от моделирането и пресмятания

Известно е, че дробането на изображението е предизвикано от флукуациите на падащия ъгъл на светлинните лъчи, обусловени от турбулентни процеси, конвекцията и пориви на вятъра [5]. В приземната атмосфера вътрешните и външни мащаби на турбулентността са от порядъка  $1 \div 10$  мм и  $1 \div 10$  м съответно. Дробането на изображението се наблюдава при характерни размери на нееднородностите, по големи от размера на входната диафрагма на телескопа – в случая  $d = 0.05$  м.

В оптичния диапазон основната причина за флукуацията на показателя на пречупване  $n$  е флукуацията на абсолютната температура на атмосферния газ  $T_a$  [6\_Ч.1]. Дисперсията на

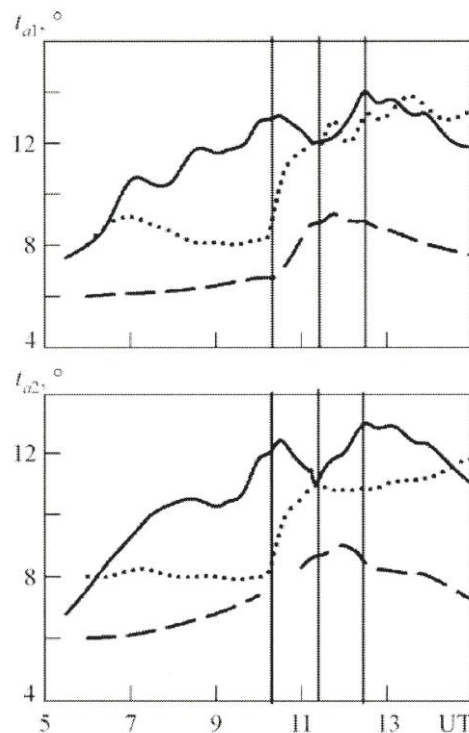
$\sigma_T^2 \approx 10^{-3} \div 1 \text{ K}^2$ . Резултатите от пресмятанията на  $\sigma_{S1}(\chi)$  (по точно  $\sigma_{S1}(t)$ ) са представени на Фиг.

1. За ъгли  $\chi \leq 75 \div 80^\circ$  тя има вида:

$$\sigma_{S1}(\chi) = \sigma_{S10} / \sqrt{\cos \chi},$$

където где  $\sigma_{S10} = \sigma_{S1}(\chi_0) \sqrt{\cos \chi_0}$ , а  $\chi_0 = \chi(t_{\min})$ . В момент  $t_{\min} \approx 11$  ч. 30 мин. данните са:  $\chi_0 \approx 41^\circ$ ,  $S_1(\chi_0) \approx 0.38''$ ,  $\sigma_{S10} \approx 0.33''$ .

Вревата зависимост  $\sigma_{S2}$  е показана също на Фиг. 4. Интересно е, че в интервала от време 04:20 – 10:10UT тя добре се апроксимира със израза:  $2\sigma_{S2}(t) \propto \cos^2 \chi(t)$ . Тази зависимост не е универсална и отразява особеностите на релефа на земната повърхност в мястото на наблюдение и в различните местности тя има различен вид [6\_Ч.2].



Фиг. 4. Вариации на температурата на въздуха в приземната атмосфера, измерени с отстоящи по хоризонталата термометри в деня на затъмнението 28 март 2006 г. (щрихованата линия), 29 март 2006 г. (непрекъснатата линия) и 30 март 2006 г. (линията от точки)

По-нататък, знаейки  $\sigma_{Sm2}(t)$ , можем да изчислим  $C_n(z_0)$ , а след това и  $C_T(z_0)$ ,  $\sigma_T(z_0)$  и  $\gamma(z_0)$ . Резултатите от пресмятанията показват, че с напредване на фазовата еволюция на слънчевото затъмнение при закриването на диска на Слънцето  $C_n$ ,  $C_T$  и  $\gamma$  намаляват, а след това с откриване на слънчевия диск се увеличават. Около 11:30 ч. ролята на конвекцията е била пренебрежимо малка. След изваждането на приноса на конвекцията от зависимостта  $\sigma_{Sm1}(t)$  можем да изчислим  $C_{n\Sigma}^2(t)$ , а също така да оценим  $C_n(t)$  в случая на еднородност на турбулентните свойства на атмосферата в рамките на определен слой с конкретни размери.

Подобни са ефектите в атмосферата на Земята и по време на ПСЗ на 29 март 2006 г. Очаквано бе, както и при затъмнението през 1999 г. близо до максималната фаза конвекцията в атмосферата да бъде напълно прекратена. Това обаче не се случи. Стойността на  $\sigma_{Sm2}$  продължи да намалява до края на измерванията. Анализа на резултатите от оценката на  $\sigma_{Sm2}$ ,  $C_n$ ,  $C_T$ ,  $\sigma_T$  и  $\gamma$  на височина  $z_0$  показва, че с течение на времето конвекцията непрекъснато намалява.

### Основни резултати

1. Използван е успешно наблюдателен метод за оценка нивото на дряжане на лимба на слънчевия диск по време на частната фазова еволюция на две пълни слънчеви затъмнения - 11 август 1999 г. и 29 март 2006 г.

2. Показано е, че наблюденията на дряжането на лимба на Слънцето по време на частичните фази на ПСЗ позволява да се раздели приноса на механичната и термична турбулентност, както и да се получи по-голям брой параметри на атмосферната турбулентност.

3. От експерименталните данни са намерени времевите зависимости на структурните функции на показателя на пречупване и температурата на въздуха в приземната атмосфера, дисперсията на флукуациите и регулярния градиент на температурата на газа. Намерени са моментите на намаляване или увеличаване на атмосферната конвекция, вътрешните мащаби на турбулентността и други параметри на приземната атмосфера.

4. Получените резултати добре се съгласуват с литературните данни за атмосферна турбулентност.

5. По определените квазипериодични вариации на средноквадратичното отклонение на преместването на края на слънчевия диск по време на ПСЗ на 11 август 1999 г., бяха определени периодите и относителните амплитуди на смущенията. Те са равни на  $20 \div 25$  мин. и  $6 \div 8$  % съответно. Такива параметри са типични за атмосферните гравитационни вълни в приземната атмосфера.

### References:

1. Chimonas G., Hines C. O. Atmospheric Gravity Waves Induced by a Solar Eclipse. // J. Geophys. Res. – 1970. – Vol. 75, No. 4. – P. 870-875.
2. Chimonas G. Internal Gravity-Wave Motions Induced in the Earth's Atmosphere by a Solar Eclipse. // J. Geophys. Res. – 1970. – Vol. 75, No. 28. – P. 5545-5551.
3. Allen KU Astrophysical quantities. - M.: Mir, 1977., 372 p.
4. Tatarsky V.I., Propagation of waves in a turbulent atmosphere. - M.: Nauka, 1967., 548 p.
5. Clifford S.F., Classical theory of wave propagation in a turbulent medium // Propagation of a laser beam in the atmosphere. - M.: Mir, 1981., S. 18-60.
6. Monin A.S., Yaglom A.M., Statistical hydrodynamics. Part 1. - Moscow: Nauka, 1965., 640 p. Statistical fluid dynamics. Part 2. - Moscow: Nauka, 1967., 720 p.